

С.Г.Демышев, О.А.Дымова

*Морской гидрофизический институт НАН Украины, г.Севастополь***ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМОВ ФОРМИРОВАНИЯ СУБМЕЗОМАСШТАБНОЙ И МЕЗОМАСШТАБНОЙ ДИНАМИКИ ВОД У ПОБЕРЕЖЬЯ КРЫМА**

Представлены результаты численного прогностического эксперимента по моделированию динамики вод Черного моря в 2006 г. Рассчитаны динамические и энергетические характеристики циркуляции с разрешением 1,6 км по горизонтали. На основе анализа компонентов бюджета кинетической и потенциальной энергии изучаются возможные физические механизмы формирования мезомасштабных и субмезомасштабных особенностей циркуляции у побережья Крыма. Показано, что вследствие усиления процессов бароклинной неустойчивости в поле течений возникают вихревые структуры с размерами порядка 10 км и временем жизни несколько суток.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: *Черное море, вихри, мезомасштабная и субмезомасштабная изменчивость, кинетическая энергия, потенциальная энергия.*

Постановка задачи. Актуальность исследования мезомасштабной динамики вод определяется, прежде всего, хозяйственными и экологическим аспектами деятельности человека на прибрежных территориях. Современные контактные и спутниковые исследования [1, 2] убедительно свидетельствуют о существенном вкладе мезо- и субмезомасштабных вихрей и течений в динамику прибрежной циркуляции. Вихри в Черном море обуславливают обмен количеством движения, теплом, солью и любыми трассерами между прибрежной и глубоководной частями моря [3]. Одним из методов исследования этих процессов является численное моделирование циркуляции вод с высоким (порядка 1 км) пространственным разрешением. Для понимания причин генерации и эволюции вихрей необходим анализ динамических и энергетических характеристик циркуляции. Целью данной работы было реконструировать трехмерные поля уровня, скоростей течений, температуры и солёности и исследовать динамические и энергетические характеристики циркуляции вод Черного моря у побережья Крыма.

Задача решается с помощью численной нелинейной термогидродинамической модели МГИ. Уравнения модели подробно описаны в [4]. Численный эксперимент по моделированию циркуляции Черного моря был проведен при следующих условиях. В качестве краевых полей использованы поля тангенциального напряжения трения ветра, полного потока тепла, испарения и осадков, полученные по данным региональной атмосферной модели “ALADIN”¹. В модели каждые сутки усваивалась температура поверхности моря, полученная по данным спутника NOAA². При проведении

¹ ALADIN – Aire Limitee Adaptation dynamique Development InterNational.

² NOAA – National Oceanic and Atmospheric Administration (Национальное управление океанических и атмосферных исследований), а также – название космических аппаратов космической метеорологической системы NOAA.

расчетов граничные поля линейно интерполировались на каждый момент времени. Для задания температуры, солёности и скорости в устьях рек и проливах использовались климатические данные. В расчёте принималось, что в верхнебосфорском течении температура и солёность та же, что и в море; в нижнебосфорском потоке солёность равнялась 35 ‰ и температура 16° С, что соответствует характеристикам вод Мраморного моря. Начальный момент времени соответствовал 28 декабря 2005 г., начальные поля уровня, температуры, солёности и скоростей течений получены в рамках проекта "Оперативная океанография" [5]. Время интегрирования – с 1 января по 31 декабря 2006 г.

Расчёты проводились на равномерной сетке с шагом по пространству 1,6 км (698 × 390 точек), по вертикали использовалось 27 z-горизонтов, шаг по времени равнялся 1,5 мин. Коэффициенты турбулентности по вертикали вычислялись в соответствии с параметризацией Меллора-Ямады 2.5 [6]. Коэффициенты горизонтальной турбулентной вязкости и горизонтальной турбулентной диффузии равны соответственно:

$$\nu^H = 10^{16} \text{ см}^4/\text{с}, \quad \kappa^H = 5 \cdot 10^{14} \text{ см}^4/\text{с}.$$

Для расчёта энергетических характеристик циркуляции модель динамики моря была дополнена блоком вычисления слагаемых в уравнениях изменения кинетической и потенциальной энергии. Символьная запись уравнения бюджета кинетической энергии (КЭ) имеет вид:

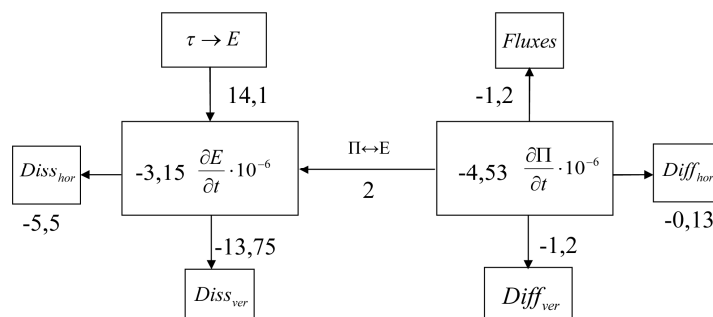
$$E_t + Adv(P + E) = \Pi \leftrightarrow E + F_{Bfr}^{\tau}(E) - Diss_{Ver}(E) - Diss_{Hor}(E) - D_{Fic}(E),$$

где $Adv(P)$ – работа сил давления, $Adv(E)$ – адвекция кинетической энергии, $\Pi \leftrightarrow E$ – работа силы плавучести, $F_{Bfr}^{\tau}(E)$ – приток от ветра и потеря за счёт трения о дно, $Diss_{Ver}(E)$ – вертикальное внутренне трение, $Diss_{Hor}(E)$ – горизонтальное внутренне трение, $D_{Fic}(E)$ – трение о боковые стенки. Сток рек и водообмен через проливы непосредственно учитывается во втором слагаемом в левой части и в последнем слагаемом правой части уравнения. Изменение потенциальной энергии (ПЭ) определяется следующим уравнением:

$$\begin{aligned} \Pi_t + Adv(\Pi) = -\Pi \leftrightarrow E - Diff_{Hor}(\Pi) + Diff_{Ver}^{Fluxes}(\Pi) - Diff_{Ver}^{\kappa_V}(\Pi) + \\ + Diff_{Ver}^{Bot-Sur}(\Pi) - Diff_{Ver}^{Add}(\Pi) \end{aligned},$$

где $Adv(\Pi)$ – адвекция потенциальной энергии, $Diff_{Hor}(\Pi)$ – горизонтальная турбулентная диффузия, $Diff_{Ver}^{Fluxes}(\Pi)$ – изменение ПЭ за счёт потоков плавучести и вертикальной внутренней диффузии, $Diff_{Ver}^{Bot-Sur}(\Pi)$ – изменение ПЭ за счёт разницы между придонной и поверхностной плотностью, $Diff_{Ver}^{\kappa_V}(\Pi)$ – изменение ПЭ за счёт неоднородности коэффициента вертикальной турбулентной диффузии по глубине, $Diff_{Ver}^{Add}(\Pi)$ – добавка за счёт нелинейной зависимости плотности от температуры и солёности. Реки и проливы учтены в адвективном слагаемом и в слагаемом, описывающем горизонтальную турбулентную диффузию.

В результате численного эксперимента были получены трехмерные поля термогидродинамических и энергетических характеристик на каждые сутки периода интегрирования. В настоящей работе представлен анализ ре-



Р и с . 1 . Схема энергетических потоков (10^{-6} эрг/см³ с) в осенний сезон.

зультатов за период с 1 сентября по 30 ноября 2006 г.

Результаты. Рассмотрим проинтегрированные по объему и осредненные за осень слагаемые в уравнениях бюджета кинетической и потенциальной энергии. Схематически направления энергетических потоков в морской системе представлены на рис.1. Полная энергия складывается из КЭ и ПЭ, обмен между которыми происходит за счет доступной потенциальной энергии и определяется работой силы плавучести. Положительное значение $\Pi \leftrightarrow E$ означает переход из ПЭ в КЭ. Потоки плавучести, определяющие стратификацию вод, и ветер – это основные источники увеличения механической энергии Черного моря. Из рис.1 видно, что в представленном численном эксперименте КЭ и ПЭ уменьшаются в среднем за осенний сезон. Осенью основной приток в КЭ идет от ветра, увеличение энергии за счет этого источника практически полностью компенсируется вертикальным трением. Работа силы плавучести увеличивает КЭ, а уменьшение происходит за счет горизонтального трения. Все основные компоненты баланса ПЭ уменьшают ее величину. Т.к. дифференциальное уравнение изменения энергии записано с точностью до константы, то указанная на схеме величина $\partial \Pi / \partial t$ определяет изменение той части потенциальной энергии, которая может переходить в кинетическую. При этом полная потенциальная энергия возрастает вследствие увеличения плотности.

Известно, что доступная потенциальная энергия является возможным источником энергии мезомасштабных вихрей. В результате усиления процессов вертикального перемешивания и охлаждения вод верхнего квазиоднородного слоя наблюдается уменьшение вертикального градиента плотности, выравнивание изопикнических поверхностей, и следовательно, уменьшение доступной потенциальной энергии. Таким образом, в среднем за осень мезомасштабная изменчивость ослабевает по сравнению с летним периодом [7].

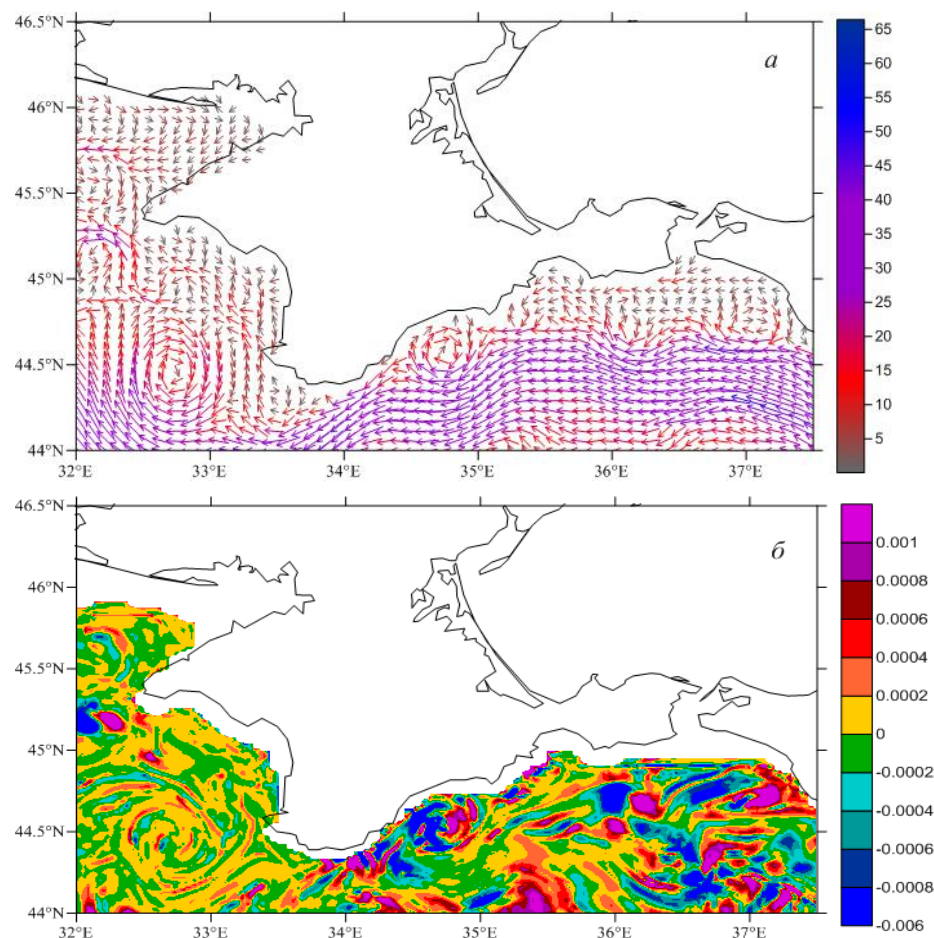
Было изучено изменение с глубиной величин слагаемых в уравнениях бюджета энергии. Основные механизмы, вызывающие изменение энергии системы, в осенний период – это горизонтальное трение и работа силы плавучести. Анализ вкладов по горизонтам показал, что основной вклад в величину $Diss_{hor}$ вносит верхний 75-метровый слой. Работа силы плавучести преимущественно положительна на верхних горизонтах до глубин 30 м, ниже величина потока отрицательна, т.е. энергия из кинетической переходит в потенциальную. Наибольший вклад в изменение потенциальной энер-

гии вносит слой 50 – 150 м, т.е. зона, где сосредоточены воды холодного промежуточного слоя.

Анализ карт горизонтальных скоростей течений показал наличие мезомасштабной и субмезомасштабной изменчивости вод моря в изучаемом районе. Под мезомасштабами мы понимаем вихревые структуры размерами 30 – 100 км и временем жизни порядка месяца; субмезомасштабы – вихри с размерами порядка 10 км и временем жизни несколько суток. Рассмотрим особенности циркуляции вод у побережья Крыма осенью 2006 г. При сопоставлении карт течений с картами касательных напряжений трения ветра выявлено, что мезомасштабные и субмезомасштабные вихри наблюдаются между берегом и Основным черноморским течением при слабых ветрах, когда величина вектора напряжения трения не превышает $0,6 \text{ дин/см}^2$. При усилении ветра струя ОЧТ прижата к берегу и вихри в представленном эксперименте не развиваются.

При изучении пространственных распределений слагаемых в уравнениях изменения КЭ и ПЭ было выявлено, что у побережья Крыма наблюдается соответствие зон генерации субмезомасштабных вихрей с зонами увеличения работы силы плавучести. Рассмотрим подробнее этот механизм. На рис.2, *а* представлено поле скорости 10 октября 2006 г. на верхнем расчетном горизонте. Видно, что в поле скорости локализованы субмезомасштабные вихри с размерами от 8 до 17 км к югу от Керченского п-ова и к востоку от м.Меганом, орбитальные скорости здесь составляют от 5 до 15 см/с, время жизни достигает 3 сут. Вихри имели антициклонический знак завихренности и прослеживались до глубин 30 – 50 м. Соответствующее 10 октября 2006 г. пространственное распределение работы силы плавучести показано на рис.2, *б*. Сравнение обеих карт показало, что области максимальных значений работы силы плавучести пространственно совпадают с расположением субмезомасштабных особенностей циркуляции в прибрежных зонах. Из рис.2, *б* видно, что в местах локализации субмезомасштабных вихрей зонам максимальных значений $\Pi \leftrightarrow E$ сопутствуют области больших отрицательных величин $\Pi \leftrightarrow E$. Т.к. величина работы силы плавучести определяется плотностью жидкости, а ее знак – вертикальной скоростью, то такое пространственное распределение свидетельствует о больших горизонтальных градиентах плотности, что является критерием развития бароклинной неустойчивости. В результате доступная потенциальная энергия переходит в кинетическую. У юго-восточного побережья Крыма расположен относительно мощный антициклонический вихрь (рис.2, *а*). Мы относим его уже к мезомасштабным вихрям, т.к. его размеры достигали 40 км, скорости 20 – 25 см/с. Время жизни указанного вихря составило 12 сут. Увеличение размера и скорости по сравнению с субмезомасштабными вихрями связано с влиянием Основного черноморского потока. Обширная область отрицательных значений работы силы плавучести (рис.2, *б*) в зоне локализации вихря свидетельствует о том, что скорости вихря подпитываются струей ОЧТ.

Таким образом, осенью 2006 г. возможным механизмом формирования субмезомасштабных особенностей циркуляции у Крымского побережья являлась бароклинная неустойчивость. Интенсификация прибрежных вихрей



Р и с . 2 . Поле скорости (см/с) на горизонте 2,5 м (а) и поле работы силы плавучести (эрг/с) на горизонте 20 м (б) 10 октября 2006 г.

происходит под влиянием струи ОЧТ.

Выводы. На основе численной термогидродинамической модели МГИ с разрешением 1,6 км реконструирована динамика вод Черного моря в 2006 г. и рассчитаны динамические и энергетические характеристики циркуляции.

У юго-восточного побережья Крыма выявлены вихревые структуры малых масштабов: мезомасштабные вихри с размерами до 40 км в диаметре и временем жизни порядка 10 – 15 сут. и субмезомасштабные вихри размерами до 17 км и временем жизни около 3 сут. Рассмотрена и подробно проанализирована изменчивость поля течений и энергетических потоков морской системы осенью 2006 г. в окрестностях Крымского п-ова. Наиболее интенсивный антициклонический вихрь формируется к юго-востоку от г.Алушта при отсутствии сильных северо-восточных ветров. Субмезомасштабные вихри возникают в прибрежных зонах к югу от Керченского п-ова.

Анализ интегральных энергетических потоков, осредненных за осенний период, показал, что основной приток в кинетическую энергию определяется действием ветра, работа силы плавучести также увеличивает кинетиче-

скую энергию. В холодные месяцы мезомасштабная изменчивость ослабевает по сравнению с летним периодом вследствие уменьшения доступной потенциальной энергии.

Возможным механизмом формирования субмезомасштабных особенностей циркуляции у побережья Крыма является бароклинная неустойчивость, которая развивается в результате увеличения горизонтального градиента плотности. Эволюция прибрежных вихрей определяется градиентом плотности и взаимодействием с Основным черноморским течением.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Правительства города Севастополя в рамках научного проекта №14-45-01641 "p_yug_a".

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Полонский А.Б., Джиганин Г.Ф. Структура и мезомасштабная изменчивость Основного Черноморского течения у побережья Крыма // Доп. НАН України.– 2010.– № 6.– С.107-112.
2. Зацепин А.Г., Кондрашов А.А., Корж А.О., Кременецкий В.В., Островский А.Г., Соловьев Д.М. Субмезомасштабные вихри на кавказском шельфе Черного моря и порождающие их механизмы // Океанология.– 2011.– т.51, № 4.– С.592-605.
3. Shapiro G.I., Stanichny S.V., Stanychna R.R. Anatomy of shelf-deep sea exchanges by a mesoscale eddy in the North West Black Sea as derived from remotely sensed data // Remote Sens. Environ.– 2010.– v.114.– P.867-875.
4. Демьшев С.Г. Численная модель оперативного прогноза течений в Черном море // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.– 2012.– т.48, № 1.– С.137-149.
5. Коротаев Г.К., Еремеев В.Н. Введение в оперативную океанографию Черного моря.– Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2006.– 382 с.
6. Mellor G.L., Yamada T. Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems // Rev. Geophys. Space Phys.– 1982.– v.20, № 4.– P.851-875.
7. Демьшев С.Г., Дымова О.А. Численный анализ мезомасштабных особенностей циркуляции в прибрежной зоне Черного моря // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана.– 2013.– т.49, № 6.– С.655-663.

Материал поступил в редакцию 20.11.2014 г.

АНОТАЦІЯ Представлені результати чисельного прогностичного експерименту з моделювання динаміки вод Чорного моря в 2006 р. Розраховані динамічні та енергетичні характеристики циркуляції з дозволом 1,6 км по горизонталі. На основі аналізу компонентів бюджету кінетичної та потенційної енергії вивчаються можливі фізичні механізми формування мезомасштабних та субмезомасштабних особливостей циркуляції біля узбережжя Криму. Показано, що внаслідок посилення процесів бароклинної нестійкості в поле течій виникають вихрові структури з розмірами порядку 10 км і часом життя кілька діб.

ABSTRACT The results of numerical experimental modeling of the Black Sea dynamics in 2006 are presented. The dynamic and energetic characteristics of circulation are calculated with a horizontal resolution 1.6 km. Possible physical mechanisms of generation of mesoscale and submesoscale circulation features near the Crimean coast are studied by analyzing the components of the kinetic and potential energy budget. It is shown that eddy structures with horizontal size about 10 km and a lifetime of several days are arisen in the current field due to intensification of the baroclinic instability process.